LIPS CCD カメラ
2002年10月観測期における線形性特性

東北大・理・天文
秋田谷 洋

Nov. 18, 2003

概 要

LIPS 用 CCD カメラの、2002 年 10 月観測期の設定における線形性を調べた。測定には、複数の積分時間にて Xe 光源を照射して得られた光量-シグナル値の関係、および、shutterless photon transfer 法に基づくシグナル値分散 $\sigma^2_{\rm ADU}$–シグナル値 $S_{\rm ADU}$ の関係、それぞれ 2 種の独立な方法を用いて、線形性を表す量、Linearity Residuals をもとに比較した。

光量-シグナル値の関係から、2^{16} ADU (約 140,000 electrons 相当) にわたるほぼ全出力シグナル値範囲で、$\pm 1\%$ 以内の良好な線形性を持つことが分かった。

また、一般には値 $\sigma^2_{\rm ADU}/S_{\rm ADU}$ がカメラのゲイン値と一致し、その値をもとに線形性の情報を得ることができるとされるが (Janesick 2001)、ゲイン値がシグナル値に対して一定では無い場合は両者は必ずしも一致しないことを示した。その上で、適当な仮定の上で真のゲイン値の分布および Linearity Residuals を得る方法を示し、シグナル値分散 $\sigma^2_{\rm ADU}$–シグナル値 $S_{\rm ADU}$ の関係から得られる線形性特性が、光量-シグナル値の関係から得られる結果と矛盾しないことが分かった。

また、観測者が設定し画像のヘッダーに記録される露出時間に対して、真の露出時間が 0.085 秒長くなっていることが、データ処理の過程で示唆された。

1 Introduction

2002 年 10 月観測期の設定における LIPS 用 CCD カメラの線形性について、(1) 複数の積分時間にて 安定光源光を照射して得られた「光量-シグナル値」の関係、および、(2) shutterless photon transfer(SLPT) 法に基づく「シグナル値分散 $\sigma^2_{\rm ADU}$–シグナル値 $S_{\rm ADU}$」の関係、それぞれ 2 種の独立な方法を用いて評価した。

本観測期の線形性に関しては、これまでにも (2) SLPT 法を用い、シグナル値分散 $\sigma^2_{\rm ADU}$、シグナル値 $S_{\rm ADU}$ を得て、カメラのゲイン値を $\sigma^2_{\rm ADU}/S_{\rm ADU}$ と見做して Linearity Residuals を求め、線形性を評価する方法を行ってきた。それによると、> 30000ADU で約 -8%、< 2000ADU で $+4-6\%$ と大きな非線形性を示していた。しかし、SLPT 法では、必ずしも $\sigma^2_{\rm ADU}/S_{\rm ADU}$ の値が、真のカメラのゲイン値とは一致しないため (A.3 節)、ここで示された非線形性が、真の線形性特性を表しているとまではいえなかった。

よって、高い信頼度で線形性の特性を知るためには、測定データから一意に線形性特性が求まる、(1)「光量 – シグナル値」の関係を用いて、改めて線形性を評価する必要があった。

本報告では、まず、安定光源光の照射時間を変えた画像から得た、「光量-シグナル値の関係」により、高い信頼性で、LIPS 用 CCD カメラ線形性の特性を明らかにする (2 節)。次に、SLPT 法で得られる「シグナル値分散–シグナル値」で得た結果が、前者の結果と矛盾しないことを示す (3 節)。

そして、今後、線形性特性の安定性を確認するにあたって、両者の測定方法をどのように用いて行くべきか議論する (4 節)。

2 光量-シグナル値関係に基づく線形性の測定

2.1 測定の概要

時間的に光量の安定した光源からの光を、異なる積分時間で CCD 上に照射して画像を取得し、照射時間 対 シグナル値の情報を得る。

この測定により、光量に正確に比例する量 ($\propto$ 光子数 $S_{\rm ph}$、電子数 $S_{\rm e}$、照射時間 $t_{\rm E}$ 等) とデジタルシグナル値 $S_{\rm ADU}$ の関係を、適当な比例定数を媒介として、一意に知ることができる。このとき、一切の仮定を含まない、Linearity Residuals : 式 (11) の値を得ることができる。

測定には、シャッターを含む光学系を組む必要があり、光源の安定性と積分時間の制御等、注意すべき点が多い。また、密で精度の高い情報を得るためには、長い測定時間を要する。

しかし、線形性特性について、仮定を排除して正確に知るためには、直接的で強力な手法である。

2.2 測定方法

実験は、以下の条件下で行った。

日時: 2002 年 10 月 29 日 0:00 ~ 4:30 (ハワイ時間)

場所: UH88 インチ望遠鏡ドーム内 (望遠鏡に LIPS を装着)

気温: 約 2.9 ℃

CCD 温度: 150 ± 0.05 K 程度で安定

使用した光源、光学系の設定は 表 1 のとおりであった。

積分時間を、2-46 秒まで 2 秒きざみ、23 段階に変えて、スペクトル画像を取得した。光量は、約 40 秒以上で画像内の最大輝度のスペクトル部分が 2^{16} ADU を越える程度に調整した。光量の安定性の確認のために、4-5 枚の画像取得毎に、20 秒積分の画像を取得した。また、実験の前後にはバイアス画像を取得した。

光源	安定化 Xe 光源
光源設置箇所	HCT 部
	(HCT を取り外した上で、較正光源入射口に向けて
	ガムテープで強固に固定)
	Turret Mirror = In
	slit = 0.2 mm
	減光のため光路中に ND2 フィルターを設置
	グレーティングは観測時と同様
取得画像形状	Xe 光のエシェル形式スペクトル

表 1: 光学系の設定

2.3 結果

20 秒 Xe 画像から、1% 以内で照射量が均一と見做せるピクセル群を選び出し (詳細は 2.4.1 節)、その領域で得た各積分時間におけるシグナル値に対して、積分時間オフセットの補正 (2.4.3 節)、照射量時間変化の補正 (2.4.1 節) を適用し、照射量 ($\propto t_{\rm E}$) 対シグナル値のデータ $S_{\rm ADU}(t_{\rm E})$ を得た。

この $S_{\rm ADU}(t_{\rm E})$ と、式 (11) から、シグナル値、および、電子数に対する Linearity Residuals LRs を得た (図 1)。シグナル値- 電子数の変換には、Linearity が充分良いと思われる 20000 ADU 付近で、分散 - シグナル値関係から得られた ゲイン定数 $k = 0.457$ ADU/electrons を用いた。

誤差として、測光誤差に起因する誤差 (各点エラーバーで表示) に加えて、照射量時間変化の補正 (2.4.1 節) に起因する誤差 (1000 ADU 以下のシグナル値において $\pm 0.3\%$ 程度、1000 ADU 以上で $\pm 0.2\%$ 程度) が加わる。

また、bias level の差引に 1 ADU 程度の不定性があるため、100 ADU 以下のシグナル値では、$100/S_{\rm ADU}$ per cent 程度の誤差が生じている可能性がある。

これらの誤差を考慮すると、線形性について、以下のことがいえる。、

100 ADU (~ 220 electrons) 以上

2^{16} ADU ($\sim 140,000$ electrons) までの測定範囲全体で、$0 \pm (0.2 - 0.3)\%$ と良好

100 ADU (~ 220 electrons) 以下

カウントの減少とともに LRs が大きくなるが、この振舞は、bias level の差引に起因する誤差でも説明できる範囲である。よって、100 ADU 以下の低カウント域の線形性については、$100/S_{\rm ADU}$ per cent の程度を越えて、はっきりしたことは言えない。

今後、本実験よりも高い精度で線形性特性を調査するためには、積分時間のオフセット値の厳密な測定、光源光の照射の時間安定 (実験中に a few $\times$ 0.1 %以内に)、a few $\times$ 0.1 ADU の程度での bias level の決定等が必要である。

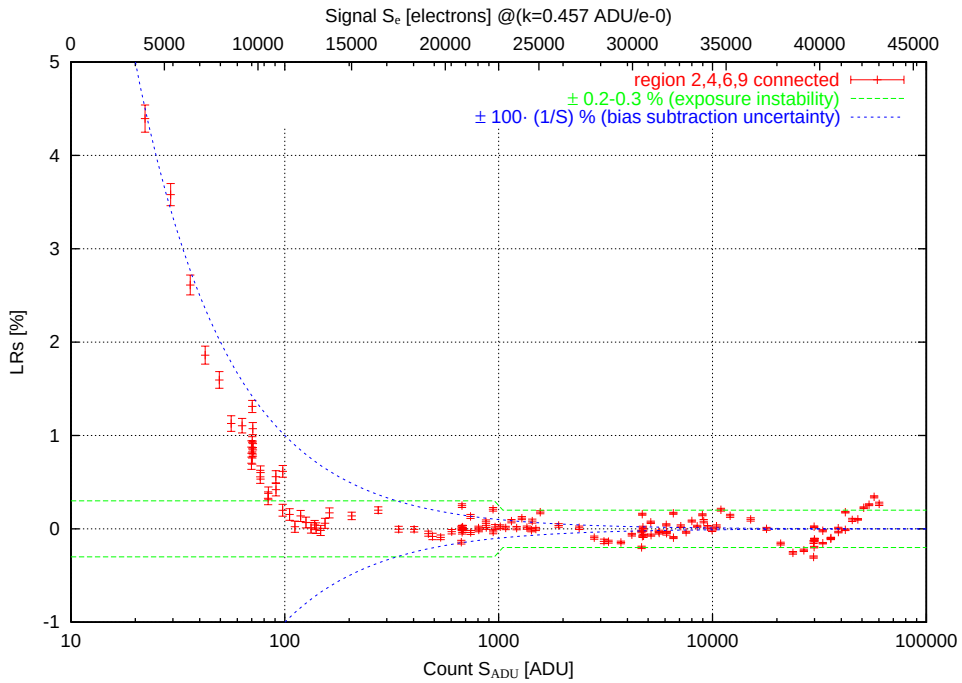

図 1: 全シグナル値範囲 ($S_{\rm ADU}$:0 – 2^{16} ADU ($\sim$ 140,000 electrons)) における Linearity Residuals : LRs %。照射量補正に起因する誤差 (緑線)、および、bias 差引に起因する誤差 (青線) の範囲を併せて表示した。

2.4 手法・補正の詳細

ここでは、Xe 光源で得た画像から「光量-シグナル値」の関係を得るにあたって必要となった、重要な手法や補正について詳細を述べる。

2.4.1 測光領域の選択

ある積分時間 $t_{\rm E}$ におけるシグナル値 $S_{\rm ADU}(t_{\rm E})$ を、高い測光精度で知るには、単位時間あたりの照射光量が均一とみなせる、ピクセル数の充分多い領域を選び、その中でシグナル値を平均化するのが良い。しかし、この実験で得られる画像はエシェル形式の複雑なスペクトル像であるため、輝度の平坦な部分が狭く、画像内で隣接する領域を選択する方法では、充分な数のピクセルが得られない (光量のばらつきが 1%以内としたときに、せいぜい several $\times$ several pixels 程度)。

そのため、以下のような方法にて、輝度が一様なピクセル群を抽出し、シグナル値を測定した。

1. 光量の安定性の確認の為に取得した、8 枚の 20 秒積分の Xe 光スペクトル像を平均化し、各単一ピクセルごとのシグナル値誤差の小さい画像を得る

2. 20 積分画像内における、適当なシグナル値範囲 ($S - \Delta S/2$ ~ $S + \Delta S/2$) を決める。$\Delta S/S$ が、必要な測光誤差 (例えば $0.01 \sim 1\%$) になるように設定する。

3. 平均化した 20 秒積分 Xe 光画像の全ピクセルから、シグナル値が上記範囲にあるピクセルを抽出し、そのピクセル群の位置を示したマスク画像を作成する。このマスクで選ばれたピクセルは、たとえ隣接しておらず、また、シグナル値の空間変化の激しい複雑なスペクトル部分に埋もれていたとしても、画像形状が安定している限りは、常にお互いに均一な光量 (毎秒あたり、約 $(S \pm \Delta S/2)/20$ ADU 相当) が照射されている部分と見做せる。

4. 各積分時間ごとの Xe 光画像について、マスクで選択されたピクセル内での平均値、もしくは中間値等の統計量を得て、積分時間 対 シグナル値の情報を得る。

この方法により、$\Delta S/S \sim 1\%$ とした場合でも、数千から 1 万数千 pixels のサンプルが得られ、低照度の場合でも十分な測光精度が得られた。

2.4.2 光量の変動とその補正

実験の間の Xe 光源の安定性を確認するため、約 10 分に 1 枚の割合で 20 秒積分の Xe 光源画像を取得した。

これらの 20 秒 Xe 光画像について、実験経過時間に対する画像内の同一の領域におけるシグナル値の変化を見たところ、経過時間に対して一次関数的な変化を示した (図 2、3)。また、選択領域によって、時間に対するシグナル値変化率は一定ではなかった。画像内の位置による、変化率の分布傾向を調査したが、特に傾向はみられなかった。

光源そのものの光量が変化する場合は、画像内の場所によらず一定のシグナル値変化率が見られるはずである。また、光源の温度変動により、光源のスペクトル形状が変化した場合は、シグナル値変化率が場所により変化し得るが、波長方向に対する系統的な傾向が見られるはずである。

これらのどちらとも一致しなかったことから、ここで見られたシグナル値の時間変化は、単純に光源そのものの光量や温度の変動ではなく、光源の固定が不十分で徐々に光源の位置がずれることなどにより、スペクトル像の形状が変化したことに起因すると考えられる。

単一の領域内では、シグナル値の時間変化はゆるやかで系統的であるため、各領域について、20 秒 Xe 画像で得られたシグナル値から、照射光量の変化を一次関数にてフィッティングし、補正することとした。

ある領域において、測定時刻 $t_{\rm obs}$ のシグナル値が $S(t_{\rm obs})$ であったとする。このとき得られる量、

$$\Delta(t) = 100 \cdot \frac{S(t_{\rm obs}) - S(0)}{S(0)} \tag{1}$$

(時間原点 $t_{\rm obs} = 0$ として、1 枚目の 20 秒 Xe 画像取得時をとった。$S(0)$ は、1 枚目の Xe 画像で得られたシグナル値。) に対して、

$$\Delta_{\rm fit}(t_{\rm obs}) = a t_{\rm obs} + b \tag{2}$$

の一次関数をフィッティングし、a、b の各定数を得る。この関数が、いま用いている領域における光量変動を示す。

次に、各積分時間で得た Xe 光源に対して、時刻原点 $t_{\rm obs}=0$ を基準に、光量の補正を行う。

積分時間 $t_{\rm exp(obs)}$ で画像を取得し、そのとき $S_{\rm ADU}$ のシグナル値が得られたとする。また、測定時刻が $t_{\rm obs}$ だったとする。この時、ここで得られたシグナル値は、仮に照射光量が時刻 $t_{\rm obs}=0$ における値だったとすれば、

$$t_{\rm exp}=t_{\rm exp(obs)}\times(1+\frac{at_{\rm obs}+b}{100}) \tag{3}$$

の積分時間を要した場合のシグナル値と見做すことができる。即ち、この画像で得たシグナル値は、積分時間 $t_{\rm exp(obs)}$ に対する値ではなく、ここで得た新たな積分時間 $t_{\rm exp}$ で得たものとする。これにより、照射光量変動の補正を施したことになる。

照射光量変動を補正後、本来補正が完全であれば一致すべき 8 枚の 20 秒積分 Xe 画像のシグナル値のばらつきは、peak-to-peak で 0.4%(>1000 ADU の領域)–0.6% (<1000 ADU の領域) 程度であった。よって、照射光量変動を補正した上でのシグナル値測定精度は、およそ $\pm0.2-0.3\%$ 程度であると考えられる。

2.4.3 積分時間オフセット時間の存在

照射光量の補正後、照射量の異なる 5 つの領域 (表 2) における Linearity Residuals、$LRs(S_{\rm ADU})$ を、シグナル値、および、積分時間に対して図 4、5 に示した。

領域	2 秒積分で得られる シグナル値	積分時間 0 ~ 46 sec で カバーするシグナル値範囲
1	$\sim$ 2500 ADU	0 – 60000 ADU
2	$\sim$ 850 ADU	0 – 20000 ADU
3	$\sim$ 450 ADU	0 – 10000 ADU
4	$\sim$ 170 ADU	0 – 4000 ADU
5	$\sim$ 40 ADU	0 – 1000 ADU

表 2: 領域とその領域でカバーするシグナル値範囲

LRs は、本来、異なるデータセットから得た場合でも、シグナル値が同じならば、差異無く、一意に決まるはずの量である。しかし、選択した領域によって、同一のシグナル値に対する $LRs(S_{\rm ADU})$ が異なっている (図 4)。

また、比較的強い照射量でデータの取得した場合 (領域 1–3)、積分時間に対する、$LRs(t_{\rm exp})$ の振る舞いは、ほぼ一致している (図 5)。照射の弱まる領域 4,5 では、相違がみられる。

即ち、ここで求めた LRs は、明らかに、積分時間に依存する何らかの系統的な変動が加わっていると考えられる。

ここで、我々が測定時に設定し記録されている積分時間 $t_{\rm exp}$ に対して、真の積分時間 $t_{\rm real}$ が、何らかの原因で Δt だけ長くなっていると仮定する。即ち、

$$t_{\rm real}=t_{\rm exp}+\Delta t \tag{4}$$

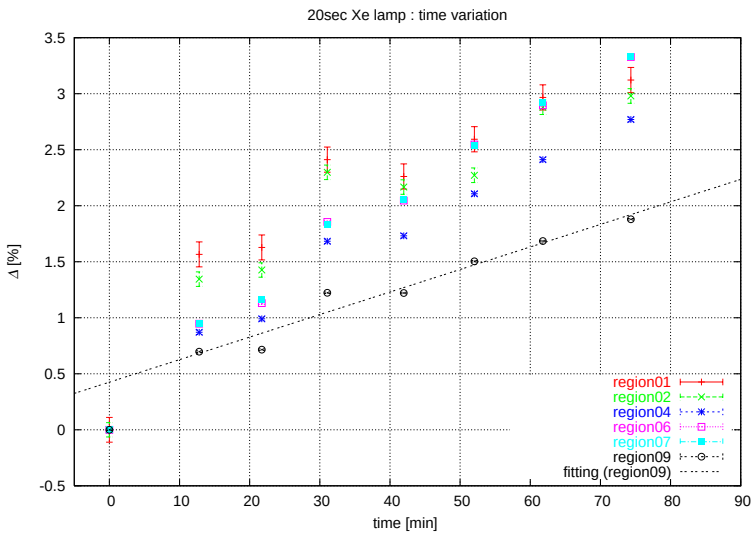

図 2: 実験経過時間に対する 20 秒 Xe 光源画像内の各領域のシグナル値変化。横軸は 1 枚目の Xe 画像取得時からの経過時間 [min]。縦軸は、1 枚目の Xe 画像で得られたシグナル値 $S(0)$ に対する、シグナル値差分 $\Delta S = S(t) - S(0)$ の割合 ($\Delta = 100 \times \Delta S/S$) [%]。それぞれの領域は、2.4.1 節で述べた方法に従って選んだ。直線は、そのうちの一つ (region09) に一次関数フィッティングを施した例。

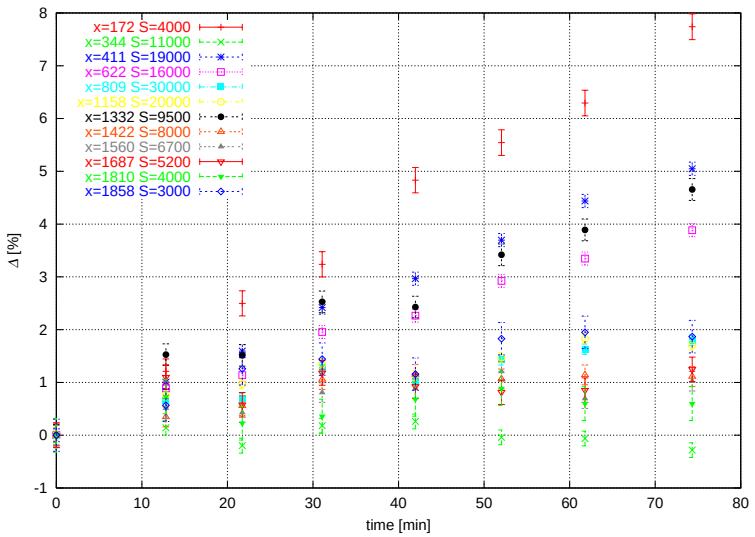

図 3: 20 秒 Xe 光源画像の、画像内、数ピクセル × 数ピクセルの狭い領域のシグナル値変化。領域は $y = 1500$ のライン上で、x 座標の値を変えて 12 箇所選択した。各領域のおよそのシグナル値 S [ADU] もあわせて示した。

このとき、真の Linearity Residuals、 $LRs_{\rm real}$ と、測定された $LRs_{\rm obs}$ の差 ΔLRs は、

$$\begin{aligned}
\Delta LRs &= LRs_{\rm obs} - LRs_{\rm real} \\
&= LRs(t_{\rm exp}) - LRs(t_{\rm exp} + \Delta t) \\
&= 100\left(1 - \frac{S_{\rm ADU_M}/t_{\rm E_M}}{S_{\rm ADU}(t_{\rm E})/t_{\rm exp}}\right) - 100\left(1 - \frac{S_{\rm ADU_M}/t_{\rm E_M}}{S_{\rm ADU}(t_{\rm E})/(t_{\rm exp}+\Delta t)}\right) \\
&= 100\frac{S_{\rm ADU_M}/t_{\rm E_M}}{S_{\rm ADU}(t_{\rm E})}\Delta t \qquad (5)
\end{aligned}$$

また、LRs を求めているシグナル値範囲で、充分線形性が良い、即ち、$LRs_{\rm real} \sim 0$ と見做せると仮定すると、

$$S_{\rm ADU}(t_{\rm E}) \sim \frac{S_{\rm ADU_M}}{t_{\rm E_M}} t_{\rm E} \qquad (6)$$

とできる。このとき、

$$\begin{aligned}
LRs_{\rm obs}(t_{\rm E}) &\sim \Delta LRs \\
&\sim 100\frac{\Delta t}{t_{\rm E}} \qquad (7)
\end{aligned}$$

と書ける。即ち、$\Delta t \neq 0$ の場合、式 (7) で表されるように、$LRs_{\rm obs}$ が積分時間 $t_{\rm E}$ に反比例し、積分時間が短い程大きくなる。

図 5 に示されている LRs の振舞には、まさにこの効果が現れていると考えられる。

式 (7) より、十分長い積分時間では LRs は Δt の影響を受けず、$\Delta LRs \to 0$ となる。さて、$\sim$ 20 秒以上の充分長い積分時間で得たデータ点においては、5 つの領域で得たどのデータセットでも、$LRs \sim 0$ である。この条件に合うデータ点のみを選びだすと、図 4 より、$> 2 - 300$ ADU では $LRs_{\rm real} \sim 0$ と見做して良いだろう。

また、最短の積分時間の 2 秒積分で得られたシグナル値が、2–300 ADU 以上となる領域 1,2,3 は、$LRs_{\rm real} \sim 0$ が成り立ち、$LRs_{\rm obs}$ には、$\Delta t \neq 0$ の効果のみが現れていると考えられる。

ここで領域 1, 2, 3 の $LRs_{\rm obs}(t_{\rm E})$ に、

$$LRs_{\rm obs}(t_{\rm E}) = 100\frac{\Delta t}{t_{\rm E}} + b \qquad (8)$$

をフィッティングすることで、Δt として、

$$\Delta t = 0.085 \pm 0.002 \ {\rm sec} \qquad (9)$$

が得られた。(式 (8) の定数項 b は、LRs を求める際に使用した基準レベル $S_{\rm ADU_M}/t_{\rm E_M}$ にも一定の誤差が含まれている可能性を考慮して加えた。)

即ち、なんらかの原因で、真の積分時間 $t_{\rm real}$ が、設定した積分時間 $t_{\rm obs}$ に対して $\Delta t = 0.085$ sec だけ長くなっていることが分かった。以後、積分時間として、画像ヘッダに記録された値に $\Delta t = 0.085$ sec を加えた値を正しい積分時間と見做す。

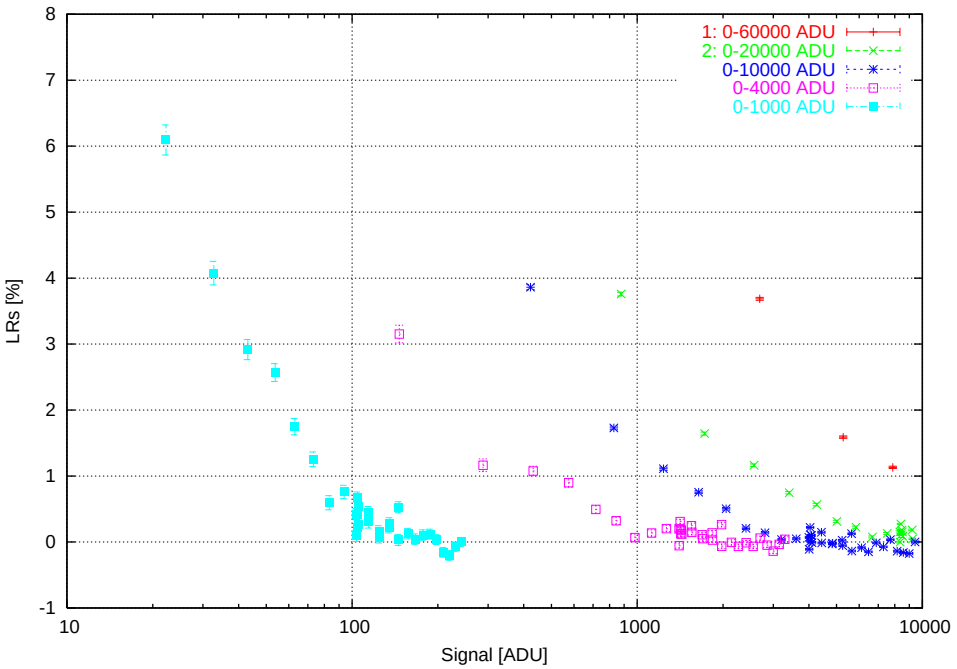

図 4: 5 つの画像内領域 (0-46sec の積分時間の幅において、カバーするシグナル値範囲が異なる) における、積分時間対シグナル値の関係から得た Linearity Residuals、LRs。シグナル値に対して示した。

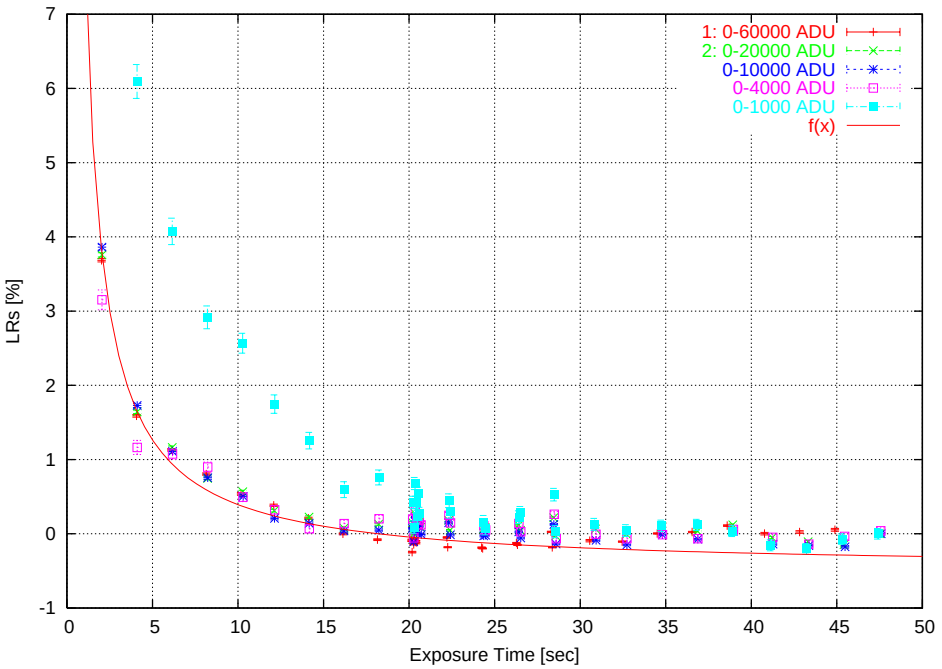

図 5: 図 4 と同様。積分時間に対して示した。曲線は、領域 1,2,3 の LRs に式 (8) をフィッティングしたもの。

3　分散-シグナル値関係に基づく線形性の測定

3.1　概要

シグナル値 $S_{\rm ADU}$ と、シグナル値分散 $\sigma^2_{\rm ADU}$ から得られる量、$k_{\rm nc}$ (式 (23)) は、式 (26) によって、系の真のゲイン値 k と結び付けられる。

k のシグナル値依存性、$(\partial k/\partial S_{\rm ADU})$ が十分小さいと仮定すると、$k_{\rm nc}$ は真のゲイン値 k と一致する (式 (27))。そのため、系のゲイン値 $k(S_{\rm ADU})$、さらに式 (14) より、Linearity Residuals、$LRs(S_{\rm ADU})$ の分布を得て、線形性特性について知ることができる。

ただし、$k_{\rm nc}$ は、$\partial k/\partial S_{\rm ADU}$ に非常に敏感なため、しばしば真のゲイン値 k とは一致せず、$k_{\rm nc}$ から直接には k を求めることができなくなることがあるので注意を要する。この場合の k の導出には、境界条件を設定した上での数値積分等の手法が必要である。

なお $k_{\rm nc}$ は、shtterless photon transfer (SLPT) 法を用いることで、シャッター等を含まない、LED 光源とカメラのみの単純な設備で測定することが可能である。この方法では、少数枚の 0 秒積分の画像にて、広く密なシグナル値範囲の $k_{\rm nc}$ の値を得ることができるため、非常に短時間で実験を完了することができる利点がある。

3.2　測定方法

SLPT 法により、シグナル値 $S_{\rm ADU}$ に対するシグナル値分散 $\sigma^2_{\rm ADU}$ の分布を得る。

光源には直流安定化電源に接続した発光ダイオード (LED) を用いた。LED は CCD chip 直前に設置し、chip 上で serial 転送方向に適度な輝度傾斜が生じるように配置を調節した。LED の輝度を段階的に変化させて、parallel 転送方向に広い overscan 領域 (1450 pixels) を持つ bias 画像を取得し、overscan 領域の各 line 内のシグナル値 (bias level は差引)、シグナル値標準偏差 (式 (15) により、光を照射していない画像から得た読みだしノイズ $\sigma_{\rm ADU(ro)}$ を差引) から、$S_{\rm ADU}$ と $\sigma^2_{\rm ADU}$ を得た。$S_{\rm ADU}$ としてデジタルシグナル値のほぼ全範囲、several – 2^{16} ADU にわたる値が得られるまで測定を続けた。

実験は、2002 年 10 月 23 日、24 日、28 日 (HST) に 3 回実施した。測定の結果が 3 回ともほぼ安定していたため、各回で得られた $S_{\rm ADU}$ と $\sigma^2_{\rm ADU}$ は一まとめにして、適当な $S_{\rm ADU}$ の bin 幅で $\sigma^2_{\rm ADU}$ を平均化し、任意の $S_{\rm ADU}$ に対する、精度の良い $\sigma^2_{\rm ADU}$ の分布を得た (図 6)。

3.3　結果

SLPT 法で得た $S_{\rm ADU}$ と $\sigma_{\rm ADU}$ から、$k_{\rm nc}(S_{\rm ADU}) = \sigma^2_{\rm ADU}/S_{\rm ADU}$(式 (23)) を求め、$S_{\rm ADU}$ に対する振舞を図 7、8 に示した。

また、真のゲイン値 $k(S_{\rm ADU})$ について、$k(S_{\rm ADU}) = k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ が成り立つと仮定し、その場合の Linearity Residuals、$LRs_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ を、式 (14) から求めた (図 9、10)。

$k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ は、全デジタルシグナル値範囲に渡って一定ではない。また、$k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ から求めた $LRs_{\rm nc}$ は、照射量-シグナル値の関係から得た LRs (図 1) と大きく異なり、以下のような振舞を示している。

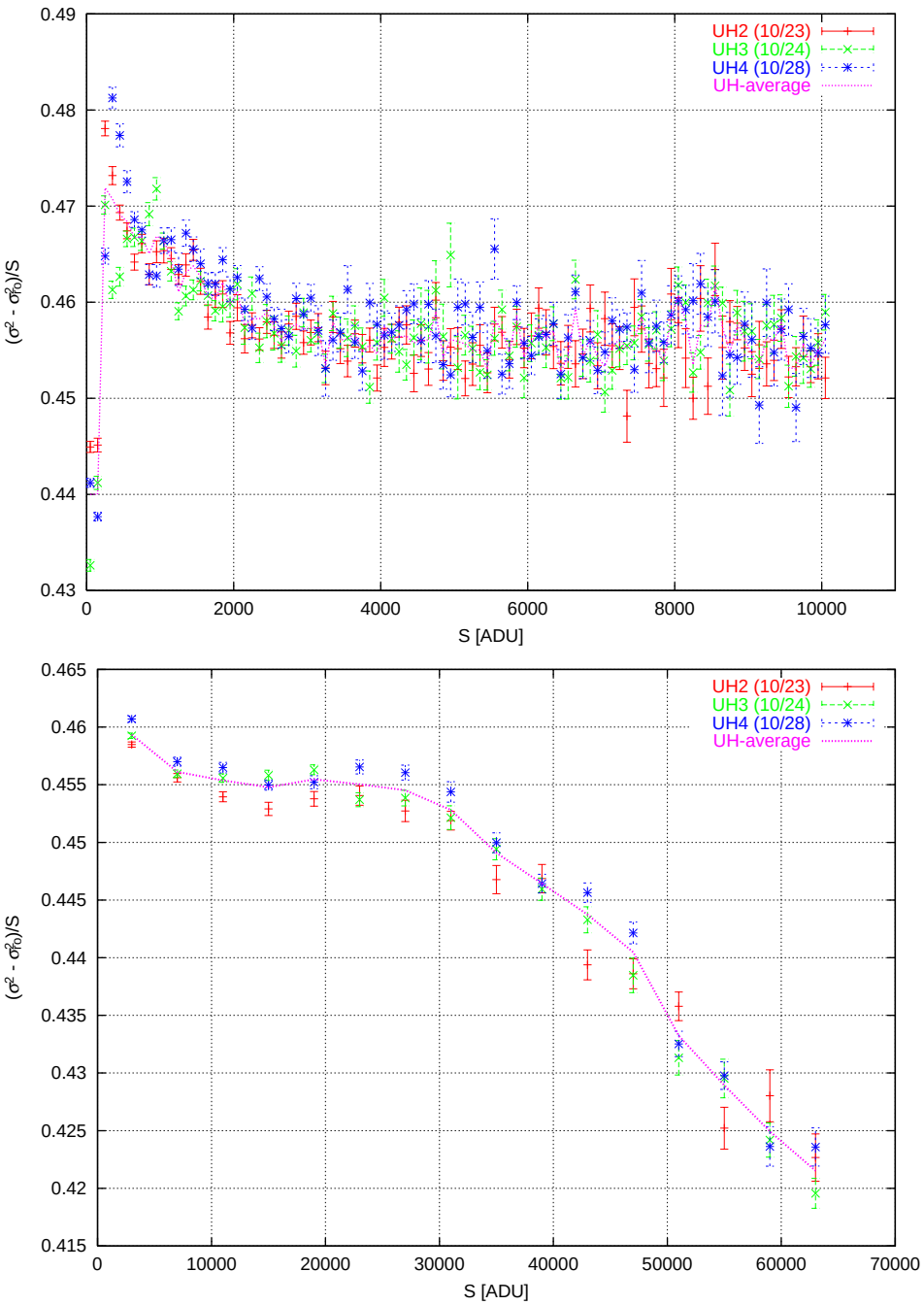

図 6: UH88 インチ望遠鏡ドーム内における、$k_{\rm nc} = \sigma^2_{\rm ADU}/S_{\rm ADU}$ の測定結果。3 回の測定それぞれの結果と、全データの平均から得た結果。

シグナル値範囲	LRs の特徴
25000–65000 ADU	$S_{\rm ADU}$ の増加とともに、0%から-8%まで変化 変化は一次関数的
5000–25000 ADU	$\sim 0\%$ でほぼ一定
250–5000 ADU	$S_{\rm ADU}$ の減少とともに、0%から 6%まで増加 変化は $S_{\rm ADU}$ に反比例的
0-250 ADU	-4%から+6%まで急激に大きく変化

ここに見られる、$LRs_{\rm nc}$ と照射量-シグナル値の関係から得た LRs との不一致は、式 (24) で定義される $\epsilon(S_{\rm ADU})$ の大きさが無視できず、測定値 $k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ が、真のゲイン値 $k(S_{\rm ADU})$ を正しく示していない (式 (28)) ためであると考えられる。$k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ から $k(S_{\rm ADU})$ を得て、線形性について議論するには、式 (30) を解く必要がある。

3.3.1 真のゲイン値 $k(S_{\rm ADU})$ の数値解析

SLPT 法による測定で得られた $k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ の分布を用いて、式 (30) を数値的に解き、$k(S_{\rm ADU})$ を得る。

簡単化のため、$k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ の測定値に対して、全シグナル値範囲を 6 つの区間に分けて一次関数で近似し、$k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ を単純な関数形で記述した (図 11)。数値解析には 4 次の Runge–Kutta 法を用いた。また、境界条件 $S_{\rm ADU_0}$、k_0 は、以下のように決定した。

適当な $k_{\rm nc}$ の測定値から k_0 を得るには、その時点では未知の、$\epsilon(S_{\rm ADU})$ の不定性を含む式 (26) を用いなければならないため、一般的には、$k_{\rm nc}$ から一意に k を知ることはできない。
さて、$\epsilon(S_{\rm ADU})$ は、シグナル値が小さく、かつ、$\partial k/\partial S_{\rm ADU}$ が小さいときに、小さくなる。このとき、式 (27) より、$k_{\rm nc}$ からおよその k が得られる。また、このときは、$\partial k_{\rm nc}/\partial S_{\rm ADU} \sim 0$、即ち、測定量 $k_{\rm nc}$ もシグナル値 $S_{\rm ADU}$ に対して平坦であると考えられる。よって、比較的信頼できる境界条件を得るには、それほどシグナル値が大きくない領域で、$k_{\rm nc}$ が平坦と見做せる部分の $S_{\rm ADU}$、$k_{\rm nc}$ を、それぞれ、$S_{\rm ADU_0}$、k_0 として選ぶのが良い。

このような方針に基づき、SLPT 法での測定による $k_{\rm nc}$ の $S_{\rm ADU}$ 依存性が、比較的平坦な領域として、$S_{\rm ADU_0} = 19000$ ADU を選んだ。また、k_0 と $k_{\rm nc}$ との相違が微少にあることも考慮して、$S_{\rm ADU_0}$ における $k_{\rm nc}$ の値 0.4550 を中心に、前後 約 $\pm 1\%$ の範囲にある、0.4500, 0.4525, 0.4550, 0.4575, 0.4600 の計 5 つを k_0 として選んだ。

以上の条件で、$k(S_{\rm ADU})$ の関数形を数値的に求めた。

3.3.2 数値解 $k(S_{\rm ADU})$ に基づく線形性の評価

得られた $k(S_{\rm ADU})$ を図 12 に示す。境界条件 $k_0 = k(19000\ {\rm ADU})$ のわずかな相違により、$k(S_{\rm ADU})$ の分布が大きく変化している。いずれも、測定による $k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ の分布と

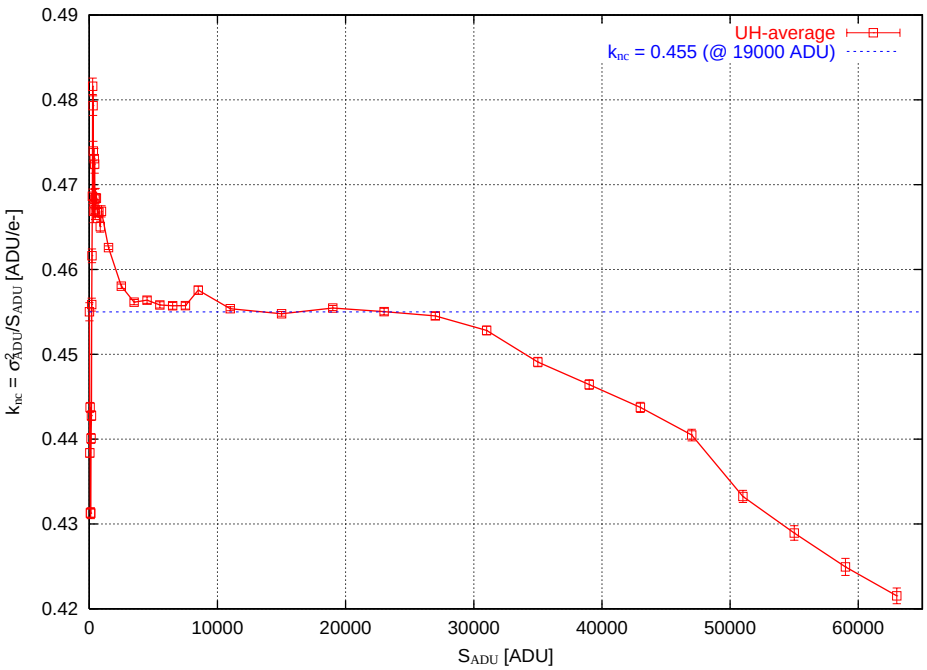

図 7: shutterless photon transfer 法により得た、 シグナル値 S_{ADU} に対する、$k_{\mathrm{nc}} = \sigma^2_{\mathrm{ADU}}/S_{\mathrm{ADU}}$ の分布。10/23, 24, 28 の 3 回の測定の結果を合わせた。0–2^{16} ADU の範囲を表示。

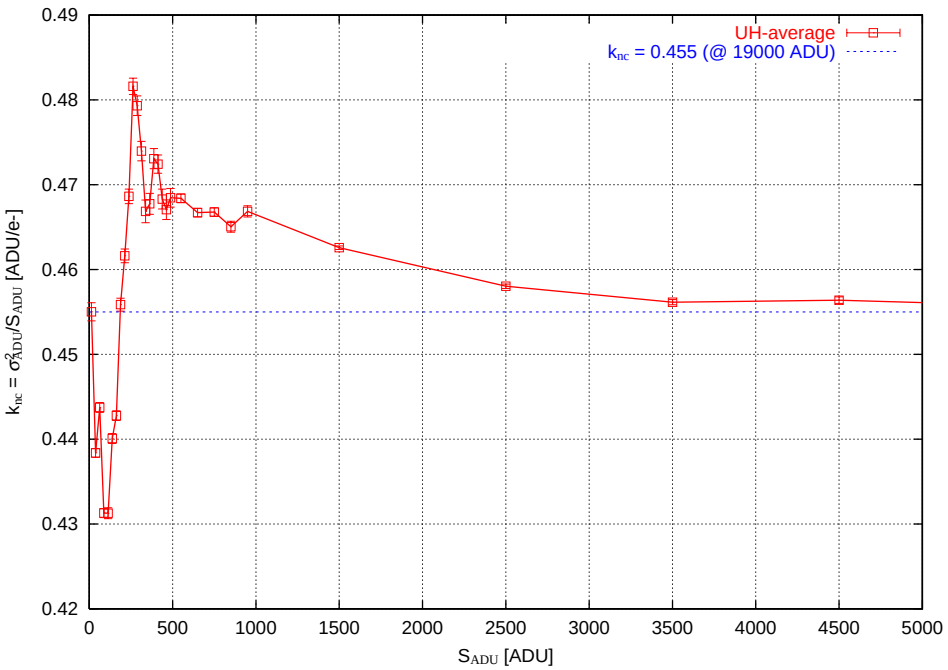

図 8: 図 7 と同様。0–5000 ADU の範囲を表示。

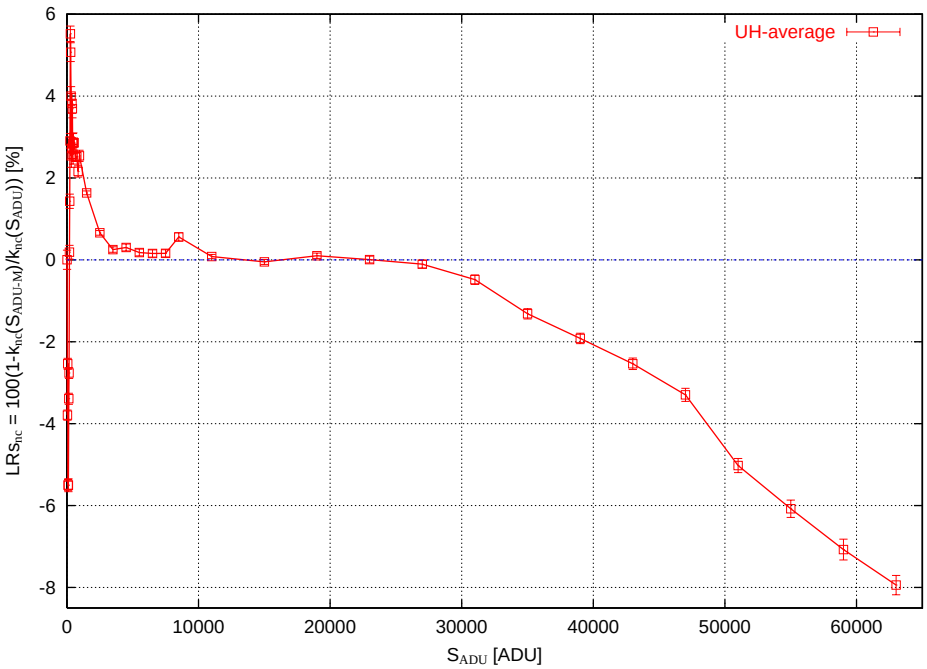

図 9: shutterless photon transfer 法で得た $k_{\rm nc}$ が、正しいゲイン値を示していると仮定して求めた、linearity residuals $LRs_{\rm nc}(S_{\rm ADU}) = 100(1 - k_{\rm nc_M}/k_{\rm nc}(S_{\rm ADU}))$。基準の $k_{\rm nc_M}$ としては、$\sim 19,000$ ADU における値 $k_{\rm nc}(19000\ {\rm ADU}) = 0.455$ を採用した。0–2^{16} ADU の範囲を表示。

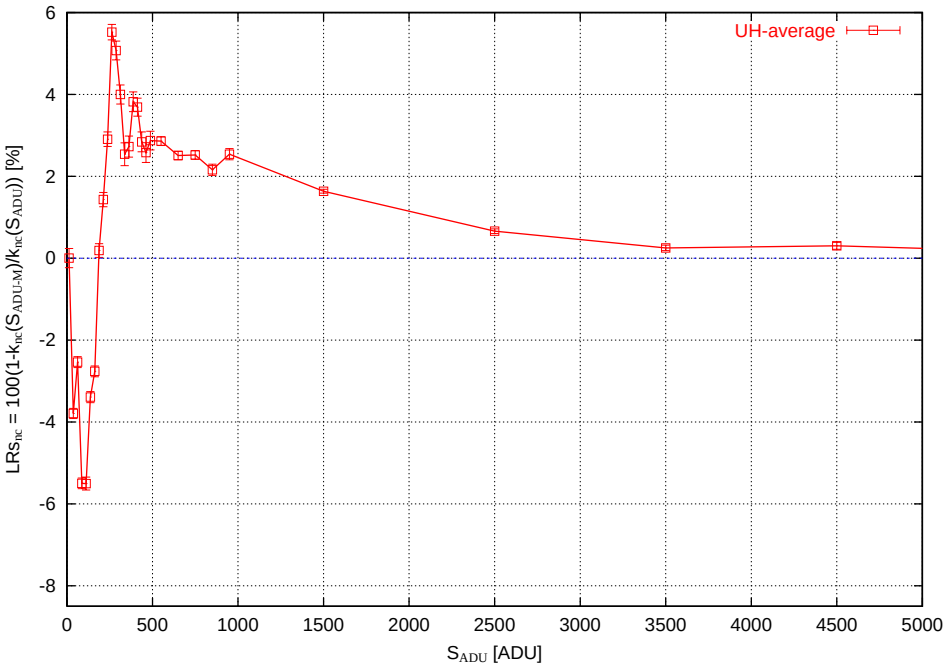

図 10: 図 9 と同様。0–5000 ADU の範囲を表示。

は、特に a few $\times$1000 ADU 以下の低カウント域で、値、形状ともに大きく異なっており、明らかに、このシグナル値域では、$k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ を直接に $k(S_{\rm ADU})$ と見做すことができなくなっていることが分かる。

また、式 (14) により Linearity Residuals $LRs(S_{\rm ADU})$ を求め、「光量-シグナル値」の関係から得られた結果と比較した (図 13)。

せいぜい $\pm 1\%$ の境界条件値の相違により、シグナル値が小さくなるにしたがって LRs の相違が増大し、a few $\times$100 ADU 以下では、相違が 5–6%まで達する。その中で、$k_0 = 0.4575, 0.4600$ とした場合の解は、LRs が $\pm 1\%$ の範囲におさまっており、「光量-シグナル値」の関係から得た線形性の特性におよそ一致している。

真のゲイン値分布 k、および、Linearity Rresiduals LRs は、境界条件 k_0 の値に非常に敏感であることが分かったが、k_0 の高精度の決定は大変困難である。これは測定量 $k_{\rm nc}$ と k と間に、常に不一致の可能性があるためである。例えば、真の k のシグナル値依存性に、2^{16} ADU あたり 1% のわずかな傾きがあっただけで、$k_{\rm nc}$ と k の相違は、19000 ADU 付近で約 0.6%に達する。すなわち、境界条件 k_0 を与えるさいにも、同程度の不定性が含まれることになる。

また、数値計算の際に与えた $k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ の関数形も、単純な一次関数で近似したものである。よって、ここで行ったような非線型微分方程式の解において、わずかな近似の誤差が、解に大きな誤差を生む可能性がある。

3.3.3 結論: 「分散-シグナル値」関係から評価した線形性のまとめ

測定量 $k_{\rm nc}$ をもとに数値的に k を解いて、線形性特性を評価した。境界条件 k_0 と $k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ の関数形が含む不定性に起因して、真のゲイン値分布 $k(S_{\rm ADU})$ を、一意に決定するまでには至らなかった。

しかし、想定しうる境界条件 k_0 の不定性の範囲内で、「光量-シグナル値」の関係から得た線形性の結果と一致する解も得られた。よって、「分散-シグナル値」の関係は、「光量-シグナル値」から得た良好な線形性特性と特に、矛盾するものではないと言って良い。

3.3.4 発展：数値解を用いて高精度の真のゲイン値を得る可能性

システムの真のゲイン値 k は、線形性を知るためのみならず、単に、系の 電子数 - ADU 値変換係数 としても重要なパラメータである。しかし、「シグナル値分散-シグナル値関係」から $k = k_{\rm nc}$ として導出を試みると、常に式 (26) に見られるように、$\epsilon(S_{\rm ADU})$ の不定性が含まれることになる。ここでの不定性はせいぜい a few %の程度と考えられ、それを越えた高い精度でゲイン値 k を知る必要がある機会は必ずしも多いとは言えない。

しかし、その不定性を排除して高い精度でゲイン値を知りたい場合には、「分散-シグナル値関係」と「光量-シグナル値関係」をともに用いて、数値積分法を組み合わせることで、実現できる可能性があることを以下で議論する。

例えば、我々の得た k の分布から求めた LRs について考える。LRs は、境界条件 k_0 の値によって、大きく変化した。しかし、その内の一つ、0.460 を与えた場合の結果は、シ

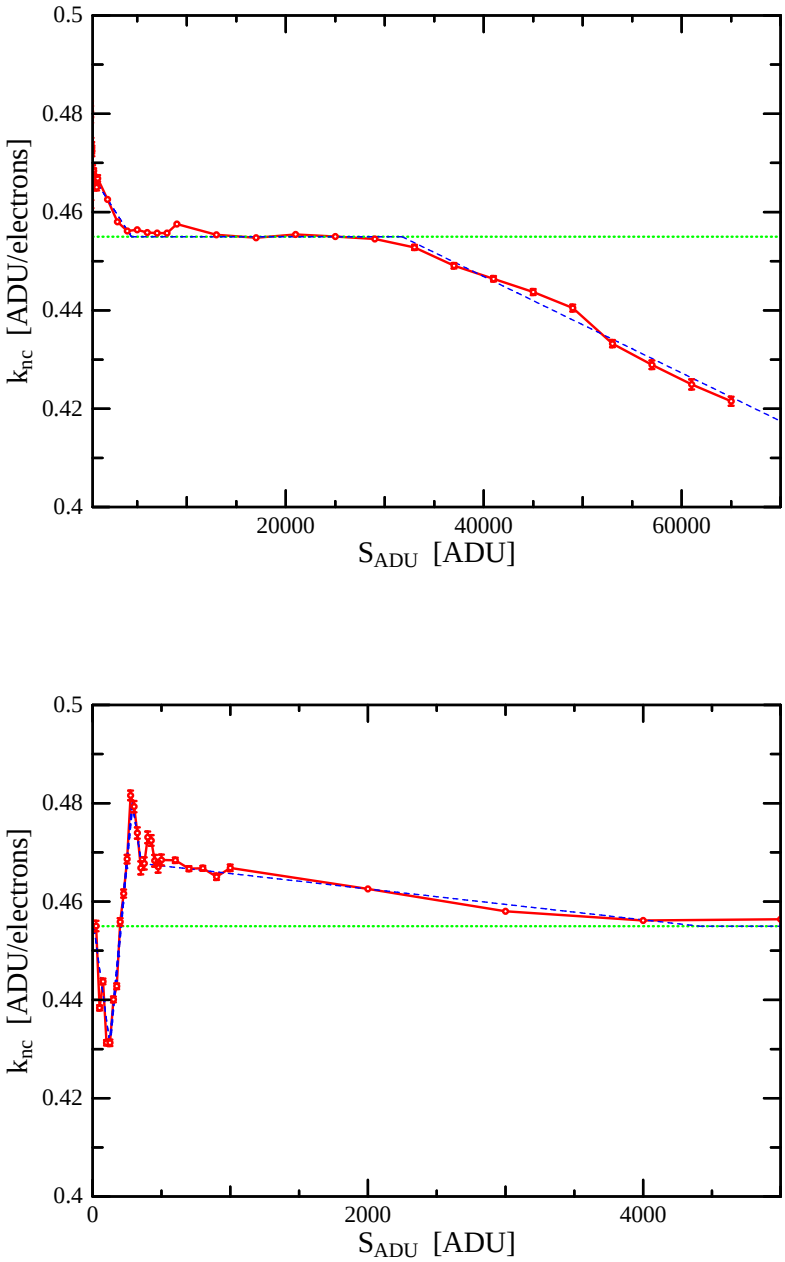

図 11: $k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ の測定値 (赤点・線)。および、6 区間に分けて、一次関数で近似し、単純化した結果 (青点線)。

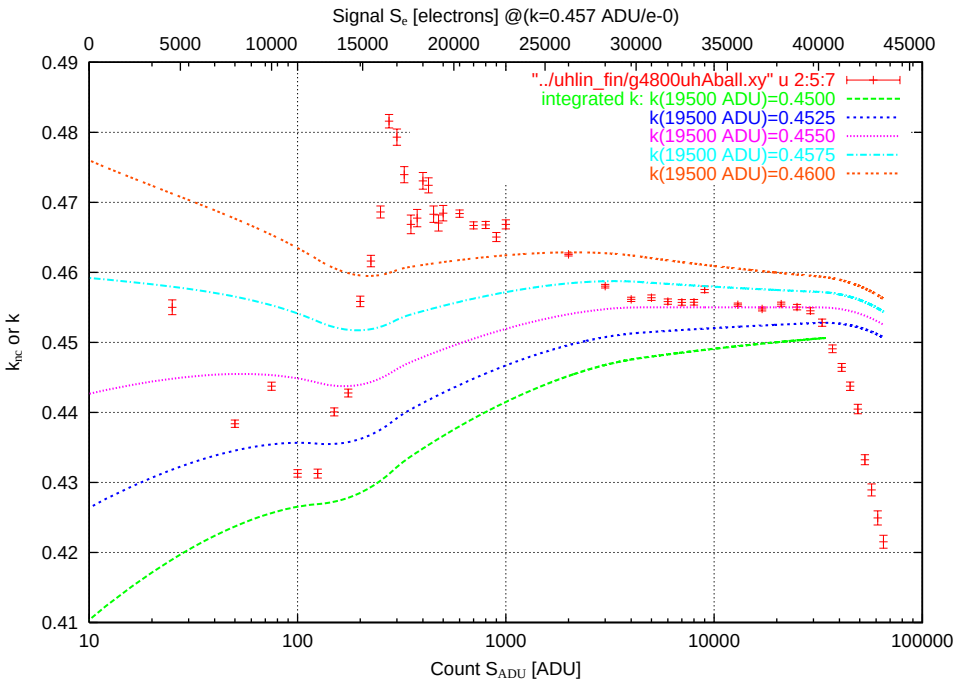

図 12: 境界条件、$S_{\rm ADU} = 19000$ ADU、$k_0 = 0.4500, 0.4525, 0.4550, 0.4575, 0.4600$ について数値的に解いた $k(S_{\rm ADU})$。測定で得た $k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ も合わせて表示した。k_0 は、19000 ADU での $k_{\rm nc} = 0.455$ を中心に、$\pm 1\%$ の範囲で選んだ。

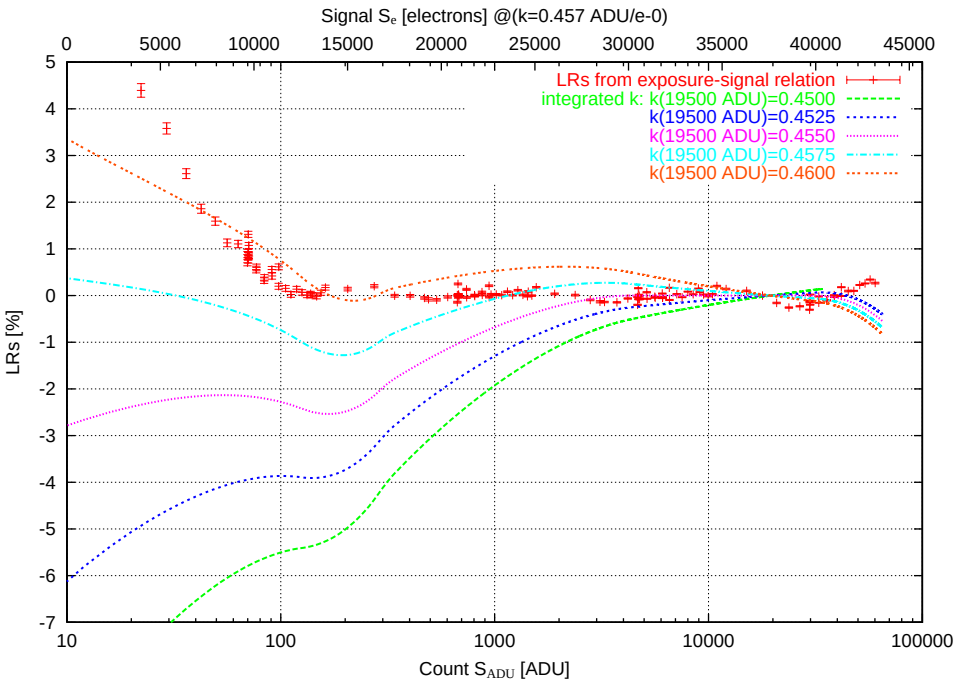

図 13: 図 11 で得た $k(S_{\rm ADU})$ から、Linearity Residuals、$LRs(S_{\rm ADU})$ を求めた。比較のために、「光量-シグナル値関係」から得た $LRs(S_{\rm ADU})$ (図 1) を併せて示した。

グナル値のほぼ全域に渡って平坦で $\pm 1\%$ の範囲に収まり、Xe 光源照射画像をもとに 2 節で得た LRs とも矛盾しなかった。ここで与えた k_0 は、$k = k_{\rm nc}$ として得た 0.455 より、約 1% 大きい。このとき、k_0 として正しい境界条件を与えたために、得られた LRs も正しい結果が得られたと判断して、k_0 によって、$\epsilon(S_{\rm ADU})$ の不定性を排除した真のゲイン値 k が求まった、と考えることができる。

もし、我々が $k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ の関数形を誤差無く知ることができ、かつ、「光量-シグナル値関係」により、線形性を示す関数 $LRs(S_{\rm ADU})$ が独立に得られている場合、以下のような方法によって、真のゲイン値 k について、$\epsilon(S_{\rm ADU})$ の不定性を含んだ不定値、$k_{\rm nc}$ としてではなく、より高い精度で決定することができるだろう。

1. 「光量-シグナル値関係」により、あらかじめ信頼性の高い LRs の分布を求める。
2. SLPT 法に基づく「シグナル値分散-シグナル値関係」より、$k_{\rm nc}$ の分布を得る。
3. $k_{\rm nc}$ を式 (30) の微分方程式に適用し、境界条件 k_0 をフリーパラメータにして、様々な k_0 に対する k 分布、および LRs 分布を、数値的に解く。
4. 「光量-シグナル値関係」の LRs と最も一致する k_0 の値を、真のゲイン値として採用する。k_0 の決定精度は、フリーパラメータ k_0 を振る際の刻み幅の程度となるだろう。

この手法を実際に使用するには、「光量-シグナル値関係」による LRs や「分散-シグナル値関係」による $k_{\rm nc}$ について、十分な精度、かつ十分細かいシグナル値分解能で知らなけらばならないだろう。その必要な精度の程度とそのとき結果として得られるゲイン値、k の精度の関係などについては、さらに議論を深める必要がある。

4 考察・結論

4.1 「光量-シグナル値関係」「シグナル値分散-シグナル値関係」の使い分け

この報告では、カメラシステムの線形性を調査するために、
(1) 安定光源光を照射して得られた「光量-シグナル値」の関係
(2)SLPT 法に基づく「シグナル値分散-シグナル値」の関係
の、2 つの方法を用いて線形性について調査した。

(1) 安定光源光を照射して得られた「光量-シグナル値」の関係からは、測定値から、直接に系の線形性を示す量、LRs が導かれるため、線形性に関して信頼性の高い情報が得られた。
実験のためにはシャッターを含む複雑な光学系を組む必要があり、光源の安定性や積分時間の制御に注意を要する。また、相応の積分時間と画像取得枚数を要するため、長時間の実験となる。

一方、(2)SLPT 法に基づく「シグナル値分散-シグナル値」の関係からは、測定値をもとに、系のゲイン値、および LRs を推定することができるが、得られた結果には、真の値との間に時に無視できない程度の系統的な誤差が含まれ、この方法から独立に正確な LRs を得ることは困難であることが分かった。また、測定量 $k_{\rm nc}$ は、真のゲイン値の関数形 k に大変敏感である。
実験は、カメラと LED 光源のみの簡単な構成で、しかも積分時間を全く要しない少数の画像でデータが得られるため、容易かつ短時間に終了することができる。
以上を踏まえて、それぞれの手法は以下のように使い分けるのが良いと考えられる。

線形性の正確な調査: 「光量 - シグナル値関係」
: 線形性について、不定性を排除して直接的で信頼度の高い情報を得る。十分なシグナル値分解能と測光精度となるように留意する。光量の安定性や積分時間制御には細心の注意を要する。

カメラ設定変更による線形性の微調整: 「分散 - シグナル値関係」
: 求まるのは $k_{\rm nc}$ で、真のゲイン値 k や LRs ではないが、$k_{\rm nc}$ は k に非常に敏感で、かつ、真の k が良好 (シグナル値依存性が小さい) であれば、$k_{\rm nc}$ も同様に素姓の良い振る舞いを示すと考られる。設定の変更ごとの、特性の相対的な比較には十分。また、カメラ単独の簡単な光学系にて短時間で情報を得る必要があるため、「光量 - シグナル値関係」に基づく測定は現実的ではない。

カメラの安定性: 「分散 - シグナル値関係」
: $k_{\rm nc}$ を測定して、過去の結果と比較する。$k_{\rm nc}$ は k に非常に敏感であるため、$k_{\rm nc}$ に大きな変化が見られなければ、即ち、線形性特性も安定していると見做してよい。過去の測定に比べて無視できない程度の相違が現れたら、設定ミスがないことを確認の上、線形性が変動したと判断して、再度「光量 - シグナル値関係」に基づく詳細な線形性の調査が必要である。

4.2 LIPS における線形性安定性調査方針

本報告により、2002 年 10 月の観測期におけるカメラの線形性特性が、ほぼすべてのシグナル値域にわたって $\pm 1\%$ 程度内で一定であることが示された。
しかし、長期に渡る変動性については、分かっていない。線形性は、例えば以下のような原因で変動しうる。

- アナログ回路の一時的な特性値変化 (環境温度、湿度等)
- アナログ回路の長期的な特性値変化 (経年変化、劣化)
- 意図しない回路の設定変更 (可変抵抗に触れてしまうなど)
- ケーブルの断線、破損、接触不良
- カメラ駆動電子ファイルの破損、誤設定、使用ファイルの選択の誤り

- その他

線形性特性の変化は、目立ちにくいため、安定性の確認には十分注意を払う必要がある。

以下に、4.1 節に基づき、LIPS の運用にあたっての、カメラの線形性特性について対処する方針について提案する。

カメラの開発期 細かな設定の変更ごとに「分散 - シグナル値関係」に基づき、線形性特性を調査し、相対的に良好な設定を探る。(既に終了)

装置性能評価期 「光量 - シグナル値関係」に基づき、詳細で信頼度の高い線形性特性の情報を得る。また、その設定における「分散 - シグナル値関係」も得ておく。(本報告)

装置運用期 観測期ごとに、SLPT 法による「分散 - シグナル値関係」に基づき線形性特性を調査し、性能評価期の結果と比較する。単純な誤設定を発見するためにも、重要な観測や実験に先駆けて行うのが望ましい。過去の結果とほぼ一致すれば、線形性は安定しているとしてよい。相違が見られた場合は、線形性が変動しうると判断し、「光量 - シグナル値関係」に基づき、詳細で信頼度の高い線形性を測定し直す。付随して生じる観測誤差の再評価なども適切に行う。(現在)

4.3 まとめ

LIPS 用 CCD カメラの、2002 年 10 月観測期の設定における線形性を調べたところ、「光量-シグナル値」の関係から、2^{16} ADU (約 140,000 electrons 相当) にわたるほぼ全出力シグナル値範囲で、$\pm 1\%$ 以内の良好な線形性を持つことが分かった。「分散 - シグナル値」の関係からは、その手法に潜在する不定性により、測定値 $k_{\rm nc}$ から系のゲイン値分布 k や線形性特性 LRs の正確な関数形を独立に得ることはできなかったが、少なくとも、考えうる不定性の範囲で光量-シグナル値の関係から得られる線形性特性の結果と矛盾はしないことが分かった。また、「分散 - シグナル値」の関係については、数学的な考察を深め、不定性を排除して数値的に真のゲイン値を求める方法について検討した。

今後、線形性特性の安定性を確認するために、観測期ごとに「分散 - シグナル値」に基づいて線形性特性を調査するのが良いだろう。

なお、観測者が設定し画像のヘッダーに記録される露出時間に対して、真の露出時間が 0.085 秒長くなっていることが、データ処理の過程で示唆された。この原因や特性の安定性などについては明らかではないので、調査が必要である。また短い積分時間にて、比較測光等を行う際にも十分留意しなければならない。

A 線形性に関わる表式

A.1 gain constant : ゲイン値

CCD 各ピクセルに生じるデジタルシグナル値 $S_{\rm ADU}$ [ADU] は、そのピクセルに蓄積された電子数 S_e [electrons] と、システムのゲイン値 $k(S_e)$ [ADU/electrons] によって、以下

のように書ける。

$$S_{\rm ADU} = k(S_e)S_e \tag{10}$$

ここで、$k(S_e)$ は、on-chip アナログ回路の電子-電圧変換率、各種アナログ回路の電圧増幅率、AD 変換回路の電圧-デジタル値変換係数等の積であり、一般に電子数 S_e の関数である[1]。
特に、$k(S_e)$ が S_e によらず一定の場合、システムの線形性は完全と言える。一方、システムの線形性を知るには、適当な測定により、S_e に対する $k(S_e)$ の関数形を知ればよい。

A.2 Linearity Residuals

安定した光源の光を、ある照射時間 $t_{\rm E}$ で CCD に照射し、得たシグナル値が $S_{\rm ADU}(t_{\rm E})$ とする。様々な照射時間で同様の測定を行い、$t_{\rm E}$ と $S_{\rm ADU}(t_{\rm E})$ の多数の組を得る。そのうち、一つの組を選び、$t_{\rm E_M}$ と $S_{\rm ADU_M}$ とする。このとき、Linearity Residuals、$LRs(S_{\rm ADU})$ [%] は、以下のように定義される。

$$LRs(S_{\rm ADU}) = 100\left(1 - \frac{S_{\rm ADU_M}/t_{\rm E_M}}{S_{\rm ADU}(t_{\rm E})/t_{\rm E}}\right) \tag{11}$$

また、電子生成は入射光量に比例するので、適当な係数 $\alpha_{\rm E}$ を用いて、

$$S_e = \alpha_{\rm E} t_{\rm E} \tag{12}$$

$$S_{\rm ADU}(t_{\rm E}) = k(S_e)S_e = k(S_e(t_{\rm E}))\cdot\alpha_{\rm E}t_{\rm E}$$

$$\frac{S_{\rm ADU}(t_{\rm E})}{t_{\rm E}} = k(S_e(t_{\rm E}))\cdot\alpha_{\rm E} \tag{13}$$

と書ける。よって、式 (11)、(13) より、$LRs(S_{\rm ADU})$ は、様々なカウント値 $S_{\rm ADU}$ におけるゲイン値、$k(S_{\rm ADU})$ と、ある適当なカウント値 $S_{\rm ADU_M}$ でのゲイン値、$k(S_{\rm ADU_M})$ を用いて、

$$LRs(S_{\rm ADU}) = 100\left(1 - \frac{k(S_{\rm ADU_M})}{k(S_{\rm ADU})}\right) \tag{14}$$

とも書ける。

ここで、Linearity Residuals $LRs(S_{\rm ADU})$ は、基準に選んだあるシグナル値での線形性 (定義により $LRs(S_{\rm ADU_M}) = 0$ %) に対する、他のシグナル値での線形性の差異を、100 分率で示す量である。

A.3 シグナル値分散 - シグナル値関係 : $\sigma^2_{\rm ADU} - S_{\rm ADU}$ relation

あるピクセルにおいて、一定の光量の照射や熱電流に起因するシグナル値を、充分多数回にわたって測定したとき、その平均値が $S_{\rm ADU}$ [ADU]、標準偏差が $\sigma_{\rm ADU(all)}$ [ADU] であったとする。また、ADU 単位での読みだし雑音を $\sigma_{\rm ADU(ro)}$ [ADU] とする。このとき、

[1] Janesick(2001) では、$K \equiv 1/k$ [electrons/ADU] を'gain constant' と定義しているが、この報告では、ここで定めた $k = K^{-1}$ [ADU/electrons] について「ゲイン値」の用語を使用する。

蓄積された電子そのものに起因するシグナル値の標準偏差 $\sigma_{\rm ADU}$ との間に以下の関係が成り立つ。

$$\sigma^2_{\rm ADU} = \sigma^2_{\rm ADU(all)} - \sigma^2_{\rm (ro)} \tag{15}$$

一方、このとき、平均として S_e [electrons] の電子が生じたとすると、各測定ごとの生成電子数不定性、σ_e [electrons] は、Poisson noise で表されるため、

$$\sigma^2_e = S_e \tag{16}$$

となる。

このとき、$\sigma_{\rm ADU}$ と、σ は、以下の誤差伝播式により結びつけられる。

$$\sigma^2_{\rm ADU} = \left(\frac{\partial S_{\rm ADU}}{\partial S_e}\right)^2 \sigma^2_e \tag{17}$$

ここで、式 (10) を S_e で微分して、

$$\frac{\partial S_{\rm ADU}}{\partial S_e} = \frac{\partial k(S_e)}{\partial S_e} S_e + k(S_e) \tag{18}$$

が得られるので、式 (17) は、式 (18)、(16)、(10) を用いて、

$$\begin{aligned}
\sigma^2_{\rm ADU} &= \left(\frac{\partial S_{\rm ADU}}{\partial S_e}\right)^2 \sigma^2_e \\
&= \left(\frac{\partial k(S_e)}{\partial S_e} S_e + k(S_e)\right)^2 S_e & (19)\\
&= \left(\frac{\partial k(S_e)}{\partial S_e} S_e + k(S_e)\right)^2 \cdot \frac{S_{\rm ADU}}{k(S_e)} & (20)
\end{aligned}$$

より、

$$\begin{aligned}
\frac{\sigma^2_{\rm ADU}}{S_{\rm ADU}} &= \left(\frac{\partial k(S_e)}{\partial S_e} S_e + k(S_e)\right)^2 \cdot \frac{1}{k(S_e)} & (21)\\
&= k(S_e) + 2\left(\frac{\partial k(S_e)}{\partial S_e}\right) S_e + \frac{1}{k(S_e)} \left[\left(\frac{\partial k(S_e)}{\partial S_e}\right) S_e\right]^2 & (22)
\end{aligned}$$

となる。ここで、

$$k_{\rm nc} \equiv \frac{\sigma^2_{\rm ADU}}{S_{\rm ADU}} \tag{23}$$

$$\epsilon(S_e) \equiv \left(\frac{\partial k(S_e)}{\partial S_e}\right) S_e \sim \left(\frac{\partial k(S_{\rm ADU})}{\partial S_{\rm ADU}}\right) S_{\rm ADU} \equiv \epsilon(S_{\rm ADU}) \tag{24}$$

と定義すると、

$$\begin{aligned}
k_{\rm nc}(S_{\rm ADU} \text{ or } S_e) &= k(S_e) + 2\epsilon(S_e) + \epsilon(S_e)^2/k(S_e) & (25)\\
&\sim k(S_{\rm ADU}) + 2\epsilon(S_{\rm ADU}) + \epsilon(S_{\rm ADU})^2/k(S_{\rm ADU}) & (26)
\end{aligned}$$

と書ける。ここで、

1. $\epsilon(S_{\rm ADU}) \sim 0$ のとき、

$$k = k_{\rm nc} \tag{27}$$

となる。即ち、$\sigma_{\rm ADU}$ と $S_{\rm ADU}$ を測定し、(23) 式により $k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ を得た場合、そのまま真のゲイン値の分布、$k(S_{\rm ADU})$ が得られる。一方、

2. $\epsilon(S_{\rm ADU}) \neq 0$ (但し $|\epsilon(S_{\rm ADU})| < 1$) のとき、

$$\begin{aligned} k &\sim k_{\rm nc} - 2\epsilon(S_{\rm ADU}) && (28)\\ &\sim k_{\rm nc} - 2\left(\frac{\partial k}{\partial S_{\rm ADU}}\right) S_{\rm ADU} && (29)\\ &\neq k_{\rm nc} \end{aligned}$$

つまり、ゲイン値 $k(S_{\rm ADU})$ の変化率 $(\partial k/\partial S_{\rm ADU})$ とシグナル値 $S_{\rm ADU}$ の積が無視できるほど十分小さくない場合は、$k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ から、真のゲイン値 $k(S_{\rm ADU})$ を f 直接得ることはできない。

ところで、式 (21)、(23)、(24) より、

$$\frac{{\rm d}k(S_{\rm ADU})}{{\rm d}S_{\rm ADU}} = \frac{\sqrt{k(S_{\rm ADU})k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})} - k(S_{\rm ADU})}{S_{\rm ADU}} \tag{30}$$

と書ける。よって、もし SLPT 法により、$k_{\rm nc}(S_{\rm ADU})$ の関数形が得られており、かつ、境界条件として、適当な $S_{\rm ADU_0}$ における $k_0 = k(S_{\rm ADU_0})$ が正しく分かっている場合、式 (30) を解析的、もしくは、数値的に解くことで、任意の $S_{\rm ADU}$ における、真のゲイン値分布、$k(S_{\rm ADU})$ を得ることができる。

参考文献

[1] J R Janesick, 2001, *"Scientific Charge-Coupled Devices (Spie Press Monograph, Pm83)"* , Society of Photo Optical